

УДК 621.317.7.001.25

**ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ МОБІЛЬНИМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ СИСТЕМНИМИ КОМПЛЕКСАМИ****Б.В.Копей<sup>1</sup>, В.В. Лопатін<sup>2</sup>, О.І.Стефанишин<sup>3</sup>**

1) Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (8-03422)4-05-34, e-mail: koreyb@iung.edu.ua

2) ІГТМ НАН України, вул.Сімферопольська,2-а, м. Дніпропетровськ

3) ЦБВО ВАТ „Укрнафта”, вул.Шевченка, 77-а, м. Борислав, Львівської обл., 79760

*Описаний інтерференційний метод вимірювання шляхової швидкості для мобільних інформаційно-вимірювальних системних комплексів, який дозволяє отримати діагностичні параметри штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ) і підйомної посудини: шляхову швидкість, прискорення і відстань до жорсткого провідника із високою точністю. Досліджено похибку методу вимірювання шляхової швидкості з використанням ефекту Доплера, яка визначається нестабільністю задаючого генератора передавача і нестабільністю доплерівської складової.*

*Описан интерференциальный метод измерения путевой скорости для мобильных информационно-измерительных системных комплексов, который позволяет получить диагностические параметры штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ) и подъемного сосуда: путевую скорость, ускорение и расстояние до жесткого проводника с высокой точностью. Исследовано погрешность метода измерения путевой скорости с использованием эффекта Доплера, которая определяется нестабильностью задающего генератора передатчика и нестабильностью доплеровской составляющей.*

*Offered interferential method of measuring of the ground speed for MIISK is perspective direction of further research. They allow to get the important diagnostic parameters of pumping units and lifting vessel: ground speed, acceleration and distance to the hard explorer (armature of mine trunk) with high exactness. The error of method of measuring of the ground speed with the use of Dopler effect is determined by instability of master clock genegator of the RDPS transmitter and instability of dopler constituent.*

Визначення швидкості і прискорення, найважливіших параметрів руху підйомних посудин чи штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ) є важливим процесом відповідних розрахунків за допомогою комплексу апаратури управління і захисту підйомних машин та вестатів-гойдалок, оскільки за Правилами безпеки від стабільності і точності їх роботи залежить надійність і безаварійність шахтного підйомного комплексу та ШСНУ. У шахтному підйомі відомі ряд методів вимірювання швидкості підйомної посудини (ШПС), які підрозділяються на прямі і непрямі (рис.1).

Багато методів, приведених на рис. 1, широко відомі і наведені в літературних джерелах. Інтерес представляють безконтактні (непрямі) методи і системи вимірювання швидкості і шляху, які за конструктивними і технологічними параметрами вигідно

відрізняються від інших методів і все частіше застосовуються в гірничій і нафтогазовій промисловості.

Найпростіше на підйомній судині реалізується метод так званого "мірного відрізка". Цей метод, наприклад, використовували шляхом нанесення магнітних міток на канаті [1], а в ІГТМ НАН України з 1993 р. у мобільних інформаційно-вимірювальних системних комплексах (МІВСК) ярусу розстрілів жорсткого армування [2].

Дискретно-аналоговий перетворювач (ДАП) працює на принципі, заснованому на визначенні середнього значення напруги інтегруванням шляхових імпульсів, що калібруються по тривалості і амплітуді, і диференціюванні одержаної напруги. Точність ДАП визначається половиною інтервалу між нанесеними магнітними мітками. В шахтній практиці крок нанесення міток обмежений і

складає 0,4-0,6 м. Проте в процесі експлуатації мітки "стираються", маскуючись на фоні шумів, що істотно знижує точність вимірювань. Крім того, на точність ДАП позначається дія зовнішніх магнітних полів.

Про необхідність введення у вимірювальну схему апаратури МІВСК давача вертикальної швидкості йдеться вже давно [3]. Висока точність вимірювань МІВСК повинна поєднуватися з високою загальною надійністю системи. Такі жорсткі вимоги до вимірювання шляхової швидкості вимушують відмовитися від перевірених і традиційних способів вимірювання швидкості і замінити їх сучасними радіотехнічними. Найперспективнішим напрямом є використання ефекту Доплера (ЕД), суть якого полягає в наступному. Якщо джерело випромінювання (передавач) електромагнітної хвилі є нерухомим щодо приймача, то в системі відліку координат, пов'язаній з приймачем, безперервна "монохроматична" електромагнітна хвиля має ту ж довжину хвилі ( $\lambda_0 = v_p / f_0$ , де  $v_p$  – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі,  $f_0$  – частота передавача), що і в системі відліку координат, пов'язаній з передавачем. Якщо ж передавач електромагнітного випромінювання рівномірно рухається щодо приймача із швидкістю  $V$ , вектор якої утворює кут  $\Theta$  по відношенню до напрямку прийому, то довжина хвилі в системі відліку, пов'язаній з приймачем, вже не буде рівною  $\lambda_0$ .

Зміна довжини хвилі дорівнює зміні відстані уздовж напрямку радіоприйому між передавачем і приймачем за період випромінюваної хвилі  $f_0^{-1}$ . Зв'язок довжини електромагнітної хвилі  $\lambda$ , що приймається, з довжиною випромінюваної хвилі  $\lambda_0$  може бути виражена так:

$$\lambda = \lambda_0 - f_0^{-1} V \cos \Theta = v_p \left( f_0 \sqrt{1 - (V/v_p)^2} \right) \times (1 - V/v_p \cos \Theta), \quad (1)$$

де  $\sqrt{1 - (V/v_p)^2}$  – множник, який враховує уповільнення часу в системі відліку координат, пов'язаній з рухомих передавачем, в результаті якого виміряне значення частоти одного і того ж коливання в системі відліку координат приймача стає меншим від частоти  $f_0$  в системі відліку, пов'язаній з передавачем.

В шахтній чи нафтопромисловій практиці мають місце такі умови:  $V \ll v_p$ ,  $\Theta < \pi/2$ , частота електромагнітної хвилі, що приходить до приймача  $f \approx f_0(1 + V/v_p \cos \Theta)$ .

Якщо передавач зближується з приймачем, то  $f \approx f_0(1 + V/\lambda_0 \cos \Theta)$ , а якщо передавач віддаляється від приймача, то  $f \approx f_0(1 - V/\lambda_0 \cos \Theta)$ .

У цьому полягає повздовжній ЕД, що дає максимально можливу зміну частоти  $f$  при одній і тій же швидкості  $V$ .

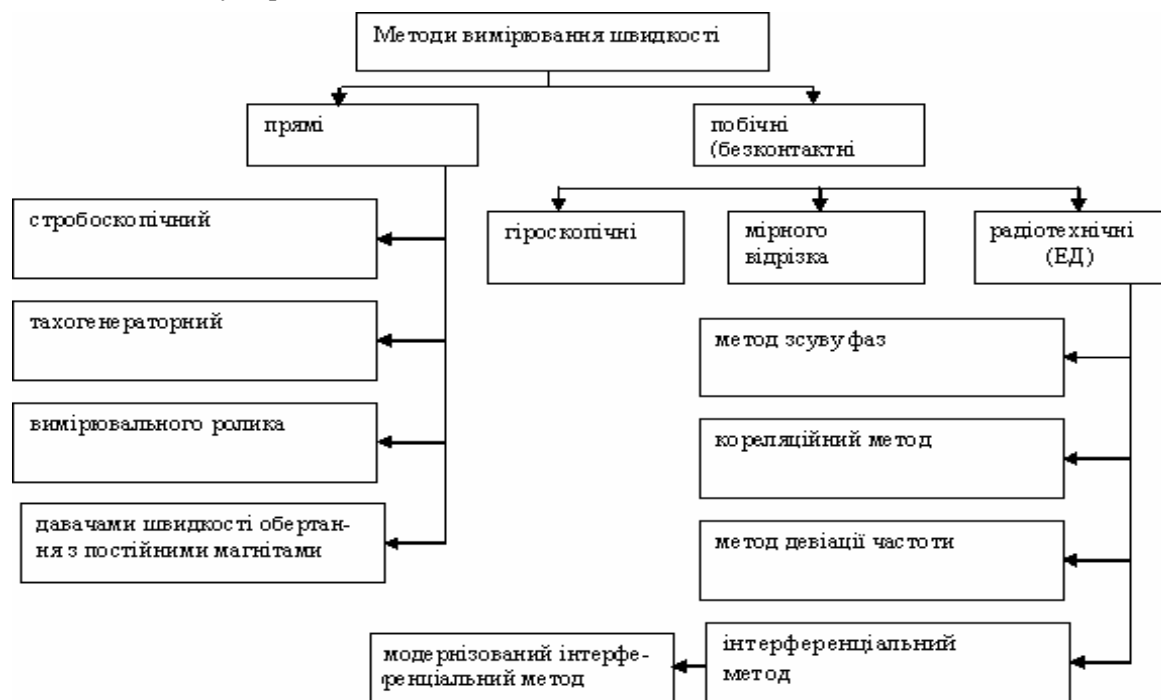


Рисунок 1 - Методи вимірювання швидкості в МІВСК

При установці передавача і приймача електромагнітних хвиль у складі МІВСК на підйомній судині доплерівський зсув частоти  $f_d = f - f_0$  відбувається двічі: при розповсюдженні хвилі від передавача до провідника жорсткого армування і при зворотному розповсюдженні від провідника до приймача. Значення  $f_d$  в нашому випадку буде таким:

$$f_d = 2V \cos \Theta \lambda_0^{-1}. \quad (2)$$

У 1977р. дослідницька лабораторія західнонімецької фірми AEG - Telefunken розробила радіотехнічну апаратуру визначення швидкості руху "Radar - vsb" для залізничних локомотивів [4]. Комплект апаратури складається з двох вузлів: давача і перетворювача. Давач виконаний у вигляді блоку розміром  $89 \times 101 \times 457$  мм, в ньому розміщені антена, НВЧ-схема, джерело живлення і вимірювальна система. Він змонтований на шасі локомотива і забезпечує електромагнітне випромінювання у напрямку рейки. Антена давача є хвильоводно-щілинними антенними ґратами, розробленими для вимірювання на малих відстанях і випромінює частоту 35 ГГц. На цій частоті утворюються достатньо потужні відбиті сигнали навіть від таких поверхонь, як іржава сталь, бетон і сніжний покрив. Крім того, на частоті 35 ГГц забезпечується висока роздільна здатність, яка дозволяє визначити прирости відстані, рівні 4 - 6 мм. У "Radar - vsb" застосований температурно-стабілізований генератор Ганна з самозміщенням і відходом по частоті менше  $5 \times 10^{-6}$  Гц на  $1^\circ\text{C}$ . Рівень випромінюваної потужності 5 - 15 мВт. Принцип роботи "Radar - vsb" наступний: відбитий від рейки електромагнітний сигнал, що приймається антеною, подається на змішувач, де він змішується з випроміненим сигналом, а сигнал доплерівської частоти, що утворюється в результаті, підсилюється і пропускається через фільтр. Потім сигнал перетворюють в цифрову форму і на основі цих даних методом диференціювання визначають швидкість і прискорення. "Radar - vsb" вимірює відстань з похибкою  $\pm 0,1\%$ , а швидкість і прискорення – з похибкою 1% у діапазоні швидкостей 0,2 – 300 км/год.

Інше конструкційне рішення (1995р.) має вітчизняний радіотехнічний давач шляхової швидкості (РДШШ) типу ППБ, розроблений для тепловоза "Україна". Для забезпечення високого завадозахисту в системі "надблизької" радіолокації використаний 5-мм діапазон

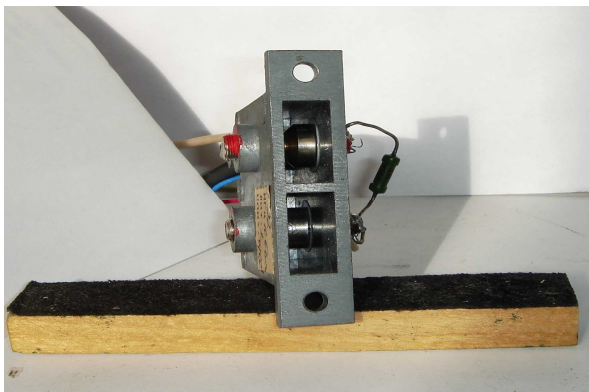
електромагнітних хвиль, який характеризується дуже високим (порядку 16 дБ/км) загасанням радіохвиль в атмосфері через їх резонансне поглинання молекулами кисню. Задаючий генератор передавача виконаний на лавинно-пролітному діоді потужністю 50 мВт, через феритовий вентиль сигнал поступає на щілинний міст, де ділиться порівну між двома плечима і випромінюється у напрямі полотна залізниці двома рупорними антенами (антенна система типу "дволик Янус") з шириною діаграми спрямованості  $10^\circ \times 10^\circ$  в обох площинах. Відбитий полотном залізниці сигнал з обох антен РДШШ (по ходу і проти ходу руху) через щілинний міст поступає на змішувач. У змішувачі відбувається змішування сигналів з обох антен і прямого сигналу задаючого генератора РДШШ, що просочується через щілинний міст. В результаті на виході змішувача формується сигнал, частота якого пропорційна швидкості руху згідно (1). Вітчизняний давач дещо поступається за характеристиками точності зарубіжному аналогу, але має дуже високу надійність і експлуатаційні параметри.

На жаль, вищезгадані залізничні давачі шляхової швидкості, які виготовляються промисловістю, хоча і вирішують аналогічну задачу, мають високу вартість.

Вперше в Україні РДШШ шахтної кліті (у схемі захисту шахтних підйомних установок) були розроблені в лабораторії НДС кафедри автоматизації гірничої промисловості Київського політехнічного інституту [5]. Відомий оригінальний, доведений до лабораторного макетного зразка, кореляційний РДШШ, який має два радіоприймачі з автономними антенами, відстань між якими  $d$ , симетрично щодо радіоприймачів розташований радіопередавач, який випромінює електромагнітні хвилі, а також перемножувач сигналів, індикатор максимуму, пристрій управління і керувану лінію затримки часу. Якщо з рухомої підйомної посудини опромінювати провідник жорсткого армування електромагнітною хвилею з постійною амплітудою і фазою, то відображений електромагнітний сигнал буде модульований по амплітуді і фазі по випадковому закону. Цей відображений сигнал буде роздільно прийнятий двома антенами приймачів РДШШ і поступає в змішувач (перемножувач) РДШШ. В ньому виділяється максимум і під дією цього сигналу управляється лінія затримки часу від  $t$  до  $t_{max}$ , чисельно рівна  $d/V$ . Якщо допустити, що за час  $t$  підйомна судина пройде відстань  $d/2$ , прийнятий сигнал другого приймача РДШШ у момент часу

$t_0 + t$  повторить сигнал першого приймача. Таким чином, між відображеними сигналами існує кореляція, максимум якої відповідає часу  $t_{max} = d/2V$ . У моменти часу між  $t_0$  і  $t_{max}$  кути падіння і віддзеркалення електромагнітної хвилі формують сигнал помилки, пропорційний відхиленню функції кореляції від максимуму, і виміряне значення шляхової швидкості буде помилковим. Модернізований РДШШ В.Д. Шиян як випромінювач-приймач вже використовував оптронний давач переміщення з відкритим оптичним каналом типа АОРС-113А. Керована лінія тимчасової затримки виконана за вищеописаною схемою. У ідеальних лабораторних умовах за висновком автора похибка давача становить 1%.

Автори брали безпосередню участь в шахтних і промислових випробуваннях макету РДШШ, що працює на ЕД для МІВСК типу "МАК" [6,7]. Давач є хвильоводною приймально-передавальною секцією (ППС), де як задаючий генератор використаний діод Гана, а приймача – НВЧ-діод (рис. 2).



**Рисунок 2 – Хвильоводна приймально-передавальна секція макету РДШШ для МІВСК типу "МАК"**

В цьому випадку радіопередавач РДШШ на базі діода Гана через відкритий хвильовід ППС (замість направленої антени) опромінював з частотою  $f_{випр}$  коробчатий провідник жорсткого армування шахтного стовбура. Цим же відкритим хвильоводом ППС на НВЧ-діод поступали: відображений сигнал від провідника з частотою  $f_{пр}$  відмінний від випромінюючого РДШШ  $f_{випр}$  на величину  $f_{доп}$  і поверхнева хвиля  $f_{випр}$  ППС РДШШ. Таким чином, на приймальному НВЧ діоді завдяки ППС РДШШ виконується ще одна функція - змішувача і на його виході утворюється напруга різницевої частоти  $f_{доп} = f_{пр} - f_{випр}$ , яка посилюється, фільтрується і обробляється.

Проаналізуємо похибку вимірювання швидкості на основі ЕД. Вимірювана шляхова швидкість пов'язана з наступними величинами: частотою передавача, частотою доплерівського зсуву і швидкістю розповсюдження електромагнітної хвилі, яку можна вважати практично постійною. Згідно теорії похибок результуючу абсолютну помилку вимірювання визначають методом найменших квадратів:

$$\delta = \sqrt{\delta_{изл}^2 + \delta_{доп}^2}, \quad (3)$$

тобто теоретично визначена похибка визначається нестабільністю задаючого генератора передавача  $\delta_{випр}$  і нестабільністю доплерівської складової  $\delta_{доп}$ .

Пропонується інтерференціальний метод вимірювання шляхової швидкості в МІВСК. Між РДШШ і провідником жорсткого армування в результаті інтерференції зондуємого радіосигналу і відображених хвиль встановлюється режим змішаних електромагнітних хвиль. Число вузлів або (і) пучностей поля при русі змінюється, підрахунок цього числа пучностей дозволяє визначити швидкість підйомної судини. Особливість картини поля стоячих хвиль при реєстрації переміщення по складних з погляду конфігурації і із значним дифузним розсіюванням від таких об'єктів, як провідників жорсткого армування, полягає в періодичній зміні сигналу, яка обумовлена інтерференцією з відображеними хвилями від ділянок об'єктів, що знаходяться на різних відстанях від РДШШ. Пропонований метод заснований на реєстрації не амплітуди, а числа вузлів електромагнітного поля, тому вищезгадана проблема не є джерелом істотних перешкод. Апаратура РДШШ може бути виготовлена як в надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні електромагнітних хвиль, так і в інфрачервоному (ІЧ). У ІЧ діапазоні виконання буде істотно простішим, але в загальному випадку приймально-передавальна апаратура РДШШ повинна розроблятися залежно від умов розповсюдження електромагнітних хвиль в середовищі і з урахуванням конкретних конструкцій.

Модифікація запропонованого методу дозволяє одночасно вимірювати шляхову швидкість підйомної посудини і відстань до провідника жорсткого армування. В цьому випадку передавач РДШШ модулюють по частоті, як розгортку в телевізорі. Зміна частоти випромінювання змінюватиме число стоячих хвиль між підйомною посудиною зі встановленою РДШШ і провідником жорсткого армування. При девіації частоти у фіксованих

межах вимірювання числа стоячих хвиль дозволяє знайти швидкість підйомної посудини і відстань до провідника жорсткого армування. Наприклад, нехай за час  $t$  частота передавача РДШШ зросла лінійно і, змінивши довжину електромагнітної хвилі в межах з  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ , при цьому число стоячих хвиль зміниться в межах з  $n_1$  до  $n_2$ . При зменшенні довжини хвиль з  $\lambda_2$  до  $\lambda_1$  число стоячих хвиль зміниться з  $n_2$  до  $n_3$ .

Виміряні  $N_1 = 2(n_1 - n_2)$  і  $N_2 = 2(n_3 - n_2)$  вузли поля стоячої хвилі відповідають зростанню і зменшенню довжини хвилі.

Зрозуміло, що на відстані  $\lambda/2$  є один вузол поля стоячої хвилі, а за час  $t$  зміна частоти при русі підйомної судини із швидкістю  $V$  відстань між ним і провідником зміниться на величину  $Vt$ , тобто справедливо, що

$$n_1 = 2l\lambda_1^{-1}, \quad n_2 = 2(l - Vt)\lambda_2^{-1}, \quad n_3 = 2(l - 2Vt)\lambda_1^{-1}.$$

Звідки

$$N_1 = 4[\lambda_1^{-1} - (l - Vt)\lambda_2^{-1}],$$

$$N_2 = 4[(l - 2Vt)\lambda_1^{-1} - (l - Vt)\lambda_2^{-1}],$$

або

$$V = \lambda_1(N_1 - N_2) \times 8t^{-1},$$

$$l - Vt = (N_1 - N_2) \times [8(\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1})].$$

Таким чином, вимірюючи  $N_1$  і  $N_2$ , можна визначити шляхову швидкість і прискорення підйомної посудини чи верстата-гойдалки і відстань до жорсткого провідника. Зрозуміло, що в загальному випадку межі вимірювання частоти в прямому і зворотному напрямі можуть не співпадати. Метод може бути успішно реалізований в ІЧ діапазоні.

## ВИСНОВКИ

Пропоновані інтерференціальні методи вимірювання шляхової швидкості для МІВСК дозволяють одержати важливі діагностичні параметри підйомної посудини: шляхову швидкість, прискорення і відстань до жорсткого провідника (армування шахтного стовбура) з високою точністю.

Виконання приймально-передавальної апаратури РДШШ для МІВСК в загальному випадку залежить від умов розповсюдження електромагнітних хвиль з урахуванням конкретних конструкцій армування шахтного стовбура і підйомної посудини.

Похибка методу вимірювання шляхової швидкості з використанням ЕД для МІВСК визначається нестабільністю задаючого

генератора передавача РДШШ і нестабільністю доплерівської складової.

## Література

1. Белоцерковский А.А., Кирюшин Ю.В. Дискретно-аналоговый преобразователь для определения параметров движения подъемной машины. Вопросы разработки шахтных стационарных установок. – Донецк. – 1982. – С.156–160.

2. Ильин С.Р., Лопатин В.В., Послед Б.С. Опыт использования акселерометров для контроля процесса динамического взаимодействия между коробчатыми проводниками и направляющими клетки со ступенчатой функцией жесткости. Деп. в ГНТБ Украины 03.01.95. – № 40. – Ук 95. – 22с.

3. Лопатин В.В. Выделение полезных сигналов датчика подсчета ярусов в системе диагностики шахтных подъемных установок. // Геотехническая механика: Межвед. науч.-техн. сб.- 1999. - Вып.15. – С. 45-52.

4. Radar begins riding the to keep track of trains progress //Electronics – 1977. – Vol, 50. – № 15. – Р. 8-10.

5. Сахневич С.Ю., Алтухова Е.И. Применение бесконтактных устройств контроля скорости движения клетки в схемах защиты шахтных подъемных установок// Республ. межвед. науч. техн. сб. 1977. – Вып. 9. – С. 17-21.

6. Ильин С.Р. Метод динамических экспресс-испытаний системы "подъемный сосуд – армровка" вертикальных стволов шахт и рудников// Геотехническая механика: Межвед. науч.-техн. сб.- 2005. – Вып. 56. – С. 149- 156.

7. Копей Б.В. , Лопатин В.В., Копей І.Б. Вимірювальні засоби контролю та експрес-діагностики обладнання нафтогазового машинобудування // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – №1(6). – С.129-133.

Поступила в редакцію 04.03.2009р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Заміховський Л.М.